УДК 621.313

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

О.П. Муравлев, А.И. Верхотуров, В.В. Големгрейн

Томский политехнический университет
E-mail: Golemgrein@mail2000.ru

Проведено математическое моделирование переходных электромеханических процессов. Оценено влияние параметров двигателя на динамические характеристики. Приведены рекомендации по разработке и созданию синхронных гибридных двигателей, обладающих высокой динамической устойчивостью работы.

Современное состояние и перспективы развития электроприводов с повышенными эксплуатационными требованиями неразрывно связаны с разработкой и созданием синхронных гибридных двигателей (СГД), объединяющих в единой конструкции положительные свойства синхронных реактивных и магнитоэлектрических машин [1, 2].

В СГД основную долю мощности вырабатывает синхронно-реактивная машина, как наиболее дешевая и простая по конструкции, а энергия постоянных магнитов используется для повышения энергетических и улучшения эксплуатационных характеристик.

Гибридные двигатели можно изготовлять на базе серийных асинхронных (конструкция статора) и синхронно-реактивных (конструкция ротора) электродвигателей, что существенно облегчает задачу создания таких машин.

При разработке гибридных двигателей важно знать динамические характеристики и синхронизирующие свойства СГД. Поэтому вопрос о влиянии параметров и угла сдвига полюсов магнитоэлектрической машины относительно полюсов синхронно-реактивной машины на динамическую устойчивость и синхронизирующие свойства гибридного двигателя особенно актуален.

Для решения поставленной задачи при общепринятых допущениях разработана математическая модель для расчёта динамических режимов СГД

$$
\begin{aligned}
U_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + \rho i_d - \psi_q \omega,\\
U_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + \rho i_q + \psi_d \omega,\\
0 &= \frac{d\psi_D}{dt} + r_D i_D,\\
0 &= \frac{d\psi_Q}{dt} + r_Q i_Q,\\
M &= H\frac{d\omega}{dt} + M_c,
\end{aligned} \qquad (1)
$$

где потокосцепления обмоток записываются следующим образом:

$$
\begin{aligned}
\psi_d &= i_d x_{dэ} + i_d x_э + i_D x_{dD} + \varepsilon\cos\lambda;\\
\psi_q &= i_q x_{qэ} + i_d x_э + i_Q x_{qQ} + \varepsilon\sin\lambda;\\
\psi_D &= i_D x_{DD} + i_d x_{dD} + \varepsilon\cos\lambda;\\
\psi_Q &= i_Q x_{QQ} + i_q x_{qQ} + \varepsilon\sin\lambda,
\end{aligned} \qquad (2)
$$

а электромагнитный момент определяется из выражения

$$M = \psi_d i_q - \psi_q i_d. \qquad (3)$$

В ур. (1–3) приняты следующие обозначения: U_d, U_q – напряжения обмотки статора по осям d и q; i_d, i_q, i_D, i_Q – токи в обмотках статора и эквивалентных роторных обмотках (ЭРО); ψ_d, ψ_q, ψ_D, ψ_Q – потокосцепления обмотки статора и ЭРО; ρ, r_D, r_Q – активные сопротивления обмотки статора и ЭРО; $x_{dэ}$, $x_{qэ}$, $x_э$ – эквивалентные индуктивные сопротивления обмотки статора СГД; x_{dD}, x_{qQ} – сопротивления взаимной индукции между обмотками статора и ротора; x_{DD}, x_{QQ} – полные индуктивные сопротивления ЭРО; ε – степень возбужденности; H – инерционная постоянная вращающихся масс.

После приведения уравнений к виду, удобному для численного интегрирования, уравнения (1–3) можно решить, например, методом Рунге-Кутта второго порядка.

Важным параметром, характеризующим запас гибридного двигателя по динамической устойчивости, рис. 1, 2, является момент выхода из синхронизма $M_{вых}$ (максимальный момент сопротивления, набрасываемый на вал двигателя, при котором двигатель еще не выходит из синхронизма).

Для определения $M_{вых}$ использовался метод наброса нагрузки [3]. Для набрасываемого момента сопротивления $M_н$ путем постепенного увеличения амплитуды момента находились два его граничных значения $M_{н1}$ и $M_{н2}$. Эти моменты должны отличаться друг от друга на заданную величину (не более чем на 1 %) и удовлетворять условию, чтобы СГД работал устойчиво при меньших моментах ($M_{н1}$) и выпадал из синхронизма при больших моментах ($M_{н2}$). За момент выхода из синхронизма принимался меньший момент ($M_{н1}$).

В качестве возмущающего воздействия принималось скачкообразное изменение момента на валу. До момента наброса нагрузки СГД работал в режиме холостого хода.

На практике встречаются возмущения в виде одного или ряда импульсов (кратковременная нагрузка двигателя). При возмущении двигателя посредством прямоугольного импульса нагрузки в нем может варьироваться как время действия, так и величина момента нагрузки.

При импульсном набросе нагрузки величина момента выхода из синхронизма обозначена как $M_{\text{вых им}}$.

Синхронные гибридные двигатели рассчитываются на прямой пуск от полного напряжения сети. СГД работает при пуске как асинхронный и должен развить скорость, близкую к синхронной, и под действием синхронизирующего момента войти в синхронизм.

Условия втягивания в синхронизм характеризуются входным моментом $M_{\text{вх}}$, равным максимальному моменту сопротивления на валу, при котором двигатель достигает синхронной скорости, работая от сети с номинальным напряжением и частотой. Для этого определялись два граничных значения момента нагрузки, отличающиеся друг от друга на фиксированную величину (не более 1 %). При этом двигатель должен втягиваться в синхронизм при меньшем значении $M_{\text{н}}$, либо при большем моменте он продолжает работать в установившемся асинхронном режиме. Исходя из этого, входной момент принимался равным меньшему из указанных $M_{\text{н}}$.

На рис. 1, 2 представлены в относительных единицах зависимости динамических характеристик от параметров СГД. При исследованиях изменялся один из параметров, остальные оставались неизменными и принимали следующие значения:

$$\lambda = -90^{\circ}; x_d / x_q = 6; x_{q1} / x_{d1} = 2{,}5;$$
$$x_{d1} / x_d = 0{,}1; \rho = 0{,}03; \varepsilon = 0{,}3; H = 200.$$

Длительность импульса при набросе нагрузки принималась 40 о.е.

Наличие максимумов в кривых моментов (рис. 1, *а*) объясняется тем, что при λ=–90° отношение эквивалентных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям СГД наибольшее и угловые характеристики синхронно-реактивной и магнитоэлектрической машин согласуются наилучшим образом.

С ростом степени возбужденности ε (рис. 1, *б*) моменты выхода из синхронизма и синхронизирующий момент растут за счёт роста магнитоэлек-

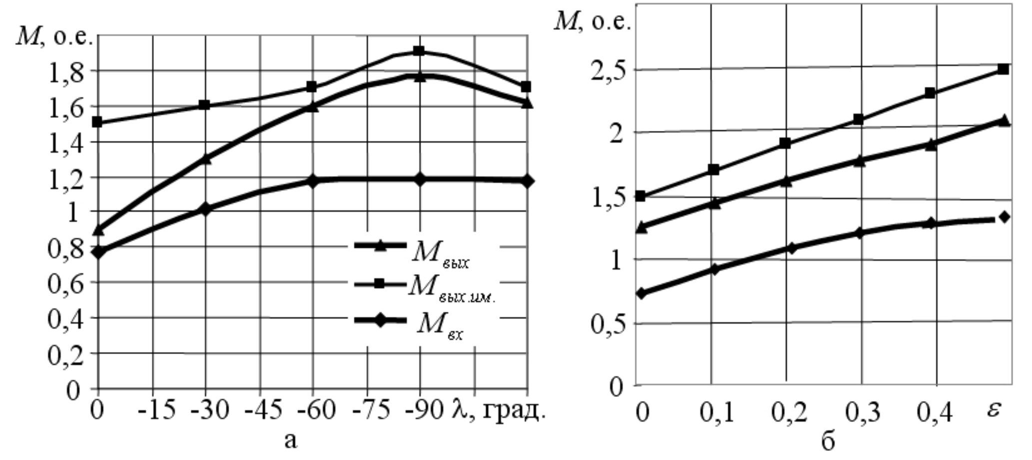


Рис. 1. *Зависимость динамических характеристик от: а) угла между осями синхронно-реактивной и магнитоэлектрической частей СГД и б) степени возбужденности*

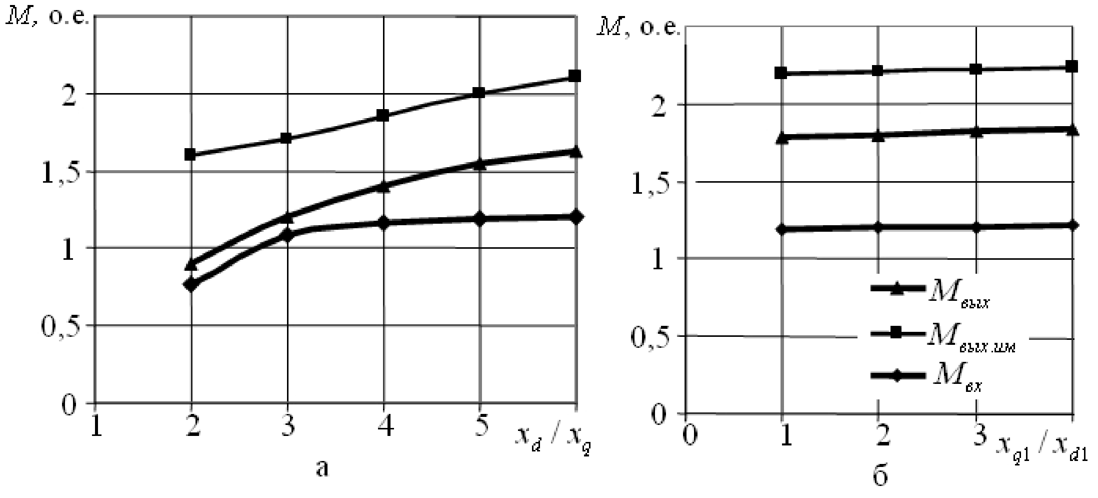


Рис. 2. *Зависимость динамических характеристик от отношения индуктивных сопротивлений: а) синхронно-реактивной части, б) магнитоэлектрической части*

трических составляющих этих моментов (как в синхронных двигателях с постоянными магнитами).

Рост отношения индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям, рис. 2, *а*, увеличивает отношение эквивалентных индуктивных сопротивлений СГД и способствует увеличению динамической устойчивости двигателя.

Выводы

1. Для синхронного гибридного двигателя существует такое взаимное расположение осей полюсов магнитоэлектрической и синхронно-реактивной машинами ($\lambda=-90°$), при котором двигатель обладает наибольшим запасом по динамической устойчивости и наилучшими синхронизирующими свойствами.
2. Степень возбужденности оказывает влияние на динамические характеристики СГД такое же, как и в синхронных двигателях с постоянными магнитами.
3. Рост отношения индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям x_d/x_q, способствует увеличению динамической устойчивости и улучшению синхронизирующих свойств.
4. Характер границ динамической устойчивости при импульсной нагрузке в зависимости от параметров гибридного двигателя совпадает с режимом наброса нагрузки бесконечной длительности, а разница заключается лишь в величине момента выхода из синхронизма при различных длительностях импульса нагрузки.
5. Момент выхода из синхронизма при одинаковых параметрах двигателя превышает момент входа в синхронизм вследствие возникновения динамического момента, действующего согласно с моментом двигателя при замедлении ротора, и противоположно при ускорении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безрученко В.А., Галтеев Ф.Ф. Итоги науки и техники. Сер. Электрические машины и трансформаторы. – М.: ВИНИТИ, 1982. – Т. 5. – 115 с.
2. А.с. 1663672 СССР. МКИ H02K 21/46. Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами / А.И. Верхотуров, В.Л. Горобец, А.С. Куминов. Опубл. 1991, Бюл. № 6.
3. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.

УДК 681.5:622.244